

# 一种对公路桥梁振动半主动控制的新策略

马涌泉, 邱洪兴, 祁永成

(东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096)

**摘 要:** 为了有效抑制隔震桥梁震后过大的梁体及支座位移, 提出了一种适合 MRD 的基于力反馈 (FF) 形式的半主动控制策略. 首先提出了采用隔震装置提供的恢复力作为主要反馈信号的半主动控制策略, 然后给出了欲使 MRD 产出预期阻尼力而应施加的电流准则, 最后设计出基于力反馈形式的半主动闭环控制系统. 分别采用 Passive-off, Passive-on, FF 和 CO 等四种控制算法对一座三跨隔震连续梁桥的各评价指标进行了计算. 结果表明: FF 算法对梁体位移、支座位移和墩底剪力的控制效果要比其他三种算法显著.

**关 键 词:** 振动控制; 公路桥梁; 磁流变液; 逆模型; 力反馈

中图分类号: O 328; U 442.55

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)06-0887-05

## A New Semi-active Control Strategy of Highway Bridge Vibration

MA Yong-quan, QIU Hong-xing, QI Yong-cheng

(College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China. Corresponding author: MA Yong-quan, E-mail: lemon9143@163.com)

**Abstract:** To effectively suppress the oversize displacement of both girder and bearing on seismically isolated bridges after an earthquake, a new semi-active control strategy based on the force-feedback (FF) fit for magneto rheological dampers (MRD) was proposed. First, the semi-active control strategy taking the restoring force provided by seismic isolation devices as the main feedback signal was proposed. Then, the current criteria which were applied to help the damping force produced by MRD approximate to the desired control force were proposed. Finally, the semi-active closed-loop control system based on the force-feedback was designed. The various evaluation criteria of tri-span seismically isolated continuous girder bridges with Passive-off control, Passive-on control, FF control and clipped optimal (CO) control were computed respectively. The results indicated that the control effects on girder displacement, bearing displacement and base shear under the FF control are more significant than those of Passive-on control, Passive-off control and CO control.

**Key words:** vibration control; highway bridge; magnetorheological fluid; inverse model; force feedback

尽可能地降低公路桥梁的地震响应一直是学者们研究的重点<sup>[1-3]</sup>. 半主动控制凭借其适应性强且对能源依赖度低等优势, 日益成为公路桥梁振动控制的主力军. 目前常用的半主动控制算法有 Clipped-Optimal (CO)<sup>[4]</sup> 和 Lyapunov<sup>[5]</sup> 等. 由于控制系统自身的非线性, 不能保证以上算法的控制效果会逼近主动控制. 此外, 目前所采用的半主动控制策略均是采用加速度作为结构状态的反

馈形式<sup>[6]</sup>. 然而这种反馈控制策略对位移及剪力的控制效果却不理想. 因此提出一种以半主动控制装置的性能为出发点, 且采用力作为结构状态反馈形式的半主动控制策略具有重要意义.

本文设计了基于力反馈的半主动闭环控制系统. 分别采用 Passive-on, Passive-off, FF 和 CO 算法对一座隔震桥梁进行了振动控制, 得出了一些重要结论, 可供类似桥梁减震设计时参考.

收稿日期: 2013-11-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51078077); “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAJ14B00).

作者简介: 马涌泉(1984-), 男, 山东安丘人, 东南大学博士研究生; 邱洪兴(1962-), 男, 江苏无锡人, 东南大学教授, 博士生导师.

## 1 基于力反馈的控制律设计

本文以一座三跨 LRB 隔震连续梁桥(简称为桥梁)为工程背景. 在地震激励下, 受磁流变阻尼器(MRD)控制的桥梁非线性运动方程为

$$M\ddot{\mathbf{x}}(t) + C\dot{\mathbf{x}}(t) + K\mathbf{x}(t) = -H\mathbf{F}_b(t) - M\eta\ddot{\mathbf{x}}_g(t) + \mathbf{u}(t). \quad (1)$$

式中:  $M$ ,  $C$  和  $K$  分别为桥梁的质量、阻尼和刚度矩阵;  $\ddot{\mathbf{x}}$ ,  $\dot{\mathbf{x}}$  和  $\mathbf{x}$  分别为桥梁的加速度、速度和位移向量;  $\mathbf{F}_b$  为 LRB 的恢复力向量;  $H$  为恢复力位置矩阵;  $\eta$  为质量惯性力位置矩阵;  $\ddot{\mathbf{x}}_g$  为地震加速度向量;  $\mathbf{u}$  为控制力向量.

本文提出的基于力反馈形式的控制策略为

$$\mathbf{u} = -\lambda \dot{\mathbf{F}}_b. \quad (2)$$

式中  $\lambda$  为正实数.

本文提出的适合式(1)的两项假设为

假设 1 恢复力  $\mathbf{F}_b$  采用 Bouc - Wen 模型描述, 即

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_b(t) &= \mu_x \dot{\mathbf{x}}(t) + \mu_w \mathbf{w}(t), \\ \dot{\mathbf{w}}(t) &= \alpha(\dot{\mathbf{x}}(t) - \beta|\dot{\mathbf{x}}(t)| |\mathbf{w}(t)|^{d-1} \mathbf{w}(t) + \\ &\quad (\beta - 1)\dot{\mathbf{x}}(t) |\mathbf{w}(t)|^d). \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $\mu_x$ ,  $\mu_w$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  和  $d$  均为系统参数;  $\mathbf{w}$  为系统内部的动力变量.

假设 2 地震干扰  $-M\eta\ddot{\mathbf{x}}_g(t)$  是未知但有界的. 假设存在一个未知常数  $G$  满足:  $|\ddot{\mathbf{x}}_g(t)| \leq G$ , 且  $\forall t \geq 0$ ; 确保  $\mathbf{w}(t)$  存在一个与  $\mathbf{x}(t)$  的有界性无关且可计算的上界  $\alpha_w$ , 即满足:  $|\mathbf{w}(t)| \leq \alpha_w$ .

**定理 1** 如果式(1)的非线性系统和式(2)的力反馈控制律均满足地震干扰的有界性假设, 则式(1)和式(2)中的闭环系统的有界输入和输出是稳定的.

证明: 式(1)和式(2)中的闭环系统可表示为

$$M\ddot{\mathbf{x}}(t) + C\dot{\mathbf{x}}(t) + K\mathbf{x}(t) = -H(\mu_x \dot{\mathbf{x}}(t) + \mu_w \mathbf{w}(t)) - M\eta\ddot{\mathbf{x}}_g(t) - \eta(\mu_x \ddot{\mathbf{x}}(t) + \mu_w \dot{\mathbf{w}}(t)). \quad (4)$$

对上式进行拉普拉斯变换, 可得到

$$[(M + \eta\mu_x)s^2 + (C + H\mu_x)s + K]\mathbf{x}(s) = -M\eta\ddot{\mathbf{x}}_g(s) - [H\mu_w + \eta\mu_w s]\mathbf{w}(s). \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{x}(s)$ ,  $\mathbf{w}(s)$  和  $\ddot{\mathbf{x}}_g(s)$  分别是信号  $\mathbf{x}(t)$ ,  $\mathbf{w}(t)$  和  $\ddot{\mathbf{x}}_g(t)$  的拉普拉斯变换. 式(5)也可变为

$$\mathbf{x}(s) = \frac{\begin{vmatrix} L_{\ddot{\mathbf{x}}_g}(s) \\ -M\eta \end{vmatrix}}{[(M + \eta\mu_x)s^2 + (C + H\mu_x)s + K]} \ddot{\mathbf{x}}_g(s) - \frac{H\mu_w + \eta\mu_w s}{[(M + \eta\mu_x)s^2 + (C + H\mu_x)s + K]} \mathbf{w}(s) = \frac{L_w(s)}{L_g(s)} \ddot{\mathbf{x}}_g(s) - \frac{H\mu_w + \eta\mu_w s}{[(M + \eta\mu_x)s^2 + (C + H\mu_x)s + K]} \mathbf{w}(s) =$$

$$L_g(s)\ddot{\mathbf{x}}_g(s) - L_w(s)\mathbf{w}(s). \quad (6)$$

式中:  $L_g(s)$  和  $L_w(s)$  为传递函数, 通过 Nyquist 稳定准则<sup>[7]</sup>可得出它们是稳定的. 因此输入信号  $\ddot{\mathbf{x}}_g(t)$  和  $\mathbf{w}(t)$  的有界性保证了输出信号  $\mathbf{x}(t)$  的有界性.

## 2 半主动控制策略的设计

### 2.1 逆模型的建立

采用逆模型<sup>[8]</sup>可获得施加于 MRD 的指令电流  $i(t)$  的解析解. 对式(3)进行逆模型化处理, 得到 MRD 的输出力  $\mathbf{Q}(t)$  的表达式为

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}(t) &= [\mu_{x,a}i(t) + \mu_{x,b}]\dot{\mathbf{x}}(t) + \\ &\quad [\mu_{w,a}i^2(t) + \mu_{w,b}i(t) + \mu_{w,c}]\mathbf{w}(t). \end{aligned} \quad (7)$$

式中:  $\mu_{x,a}$ ,  $\mu_{x,b}$ ,  $\mu_{w,a}$ ,  $\mu_{w,b}$  和  $\mu_{w,c}$  均为逆模型的参数.

式(7)中的  $i(t)$  满足:

$$\alpha = \alpha_a i^2(t) + \alpha_b i(t) + \alpha_c. \quad (8)$$

式中:  $\alpha_a$ ,  $\alpha_b$  和  $\alpha_c$  均为逆模型的参数.

式(3)中的  $\mathbf{w}(t)$  可表示为

$$\mathbf{w}(t) = \text{sgn}(\dot{\mathbf{x}}). \quad (9)$$

式中:  $\text{sgn}(\dot{\mathbf{x}})$  为速度向量  $\dot{\mathbf{x}}$  的符号函数.

故 MRD 的输出力  $\mathbf{Q}(t)$  可重新记为

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}(t) &= [\mu_{x,a}i(t) + \mu_{x,b}]\dot{\mathbf{x}}(t) + \\ &\quad [\mu_{w,a}i^2(t) + \mu_{w,b}i(t) + \mu_{w,c}]\text{sgn}(\dot{\mathbf{x}}) = \\ &\quad [\mu_{w,a}\text{sgn}(\dot{\mathbf{x}})]i^2(t) + [\mu_{x,a}\dot{\mathbf{x}}(t) + \\ &\quad \mu_{w,b}\text{sgn}(\dot{\mathbf{x}})]i(t) + [\mu_{x,b}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mu_{w,c}\text{sgn}(\dot{\mathbf{x}})]. \end{aligned} \quad (10)$$

电流  $i(t)$  可以通过求解以下二次方程得到:

$$\begin{aligned} \mu_{w,a}|\text{sgn}(\dot{\mathbf{x}})|^2 i^2(t) + \mu_{x,a}|\dot{\mathbf{x}}(t)| + \mu_{w,b}|\text{sgn}(\dot{\mathbf{x}})| i(t) + \\ \mu_{x,b}|\dot{\mathbf{x}}(t)| + \mu_{w,c}|\text{sgn}(\dot{\mathbf{x}})| - \mathbf{Q}(t) = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

### 2.2 指令电流的选择

本文通过改变电流  $i$  来促使 MRD 产出预期阻尼力  $f_d$ , 应用于此策略的指令电流  $i(t)$  的解为

$$i(t) = i(\dot{\mathbf{x}}, \mathbf{Q}) = \frac{-h_1 \pm \sqrt{h_1^2 - 4h_2h_0}}{2h_2}. \quad (12)$$

式中:

$$\begin{aligned} h_0 &= \mu_{x,b}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mu_{w,c}\text{sgn}(\dot{\mathbf{x}}) - f_d(t), \\ h_1 &= \mu_{x,a}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mu_{w,b}\text{sgn}(\dot{\mathbf{x}}), \\ h_2 &= \mu_{w,a}\text{sgn}(\dot{\mathbf{x}}). \end{aligned} \quad (13)$$

MRD 的预期阻尼力  $f_d$  可采用下式计算:

$$f_d = \mathbf{u} = -\lambda \dot{\mathbf{F}}_b. \quad (14)$$

式(12)和(14)即为基于力反馈的半主动控制器. 由  $f_d$  并运用式(13)便可算出相应的施加于

MRD 的指令电流  $i$ , 其表达式为

$$i = \begin{cases} \max\{i_\alpha, i_\beta\}, i_\alpha, i_\beta \in [0, i_{\max}] \\ \min\{i_\alpha, i_\beta\}, \begin{cases} \min\{i_\alpha, i_\beta\} \in [0, i_{\max}] \\ \max\{i_\alpha, i_\beta\} \notin [0, i_{\max}] \end{cases} \\ i_{\max}, i_\alpha, i_\beta > 0, \min\{i_\alpha, i_\beta\} \notin [0, i_{\max}] \\ \max\{i_\alpha, i_\beta\}, \begin{cases} \min\{i_\alpha, i_\beta\} < 0 \\ \max\{i_\alpha, i_\beta\} \in [0, i_{\max}] \end{cases} \\ i_{\max}, \begin{cases} \min\{i_\alpha, i_\beta\} < 0 \\ \max\{i_\alpha, i_\beta\} \geq i_{\max} \end{cases} \\ 0, \max\{i_\alpha, i_\beta\} < 0 \\ \operatorname{Re}(i_\alpha), i_\alpha \in \mathbf{Z} \text{ or } \mathbf{R}, 0 \leq \operatorname{Re}(i_\alpha) \leq i_{\max} \\ 0, i_\alpha \in \mathbf{Z} \text{ or } \mathbf{R}, \operatorname{Re}(i_\alpha) < 0 \\ i_{\max}, i_\alpha \in \mathbf{Z} \text{ or } \mathbf{R}, \operatorname{Re}(i_\alpha) > i_{\max} \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $i_\alpha$  和  $i_\beta$  分别为式 (12) 的两个根, 且  $[0, i_{\max}]$  为电流的容许范围;  $\operatorname{Re}(i_\alpha)$  为  $i_\alpha$  的实部;  $\mathbf{Z}$  代表复数集;  $\mathbf{R}$  代表实数集. 通过上式便可使 MRD 实际产出的阻尼力非常逼近  $f_d$ .

### 3 数值分析

桥梁参数见文献 [9]. 逆模型参数见表 1.

表 2 不同控制策略下的隔震桥梁各评价指标值

Table 2 Various evaluation criteria of seismically isolated bridges controlled by different strategies

评价指标	无控制		Passive - off		Passive - on		CO		FF	
	Max	Ave	Max	Ave	Max	Ave	Max	Ave	Max	Ave
墩底剪力峰值 $J_1/\text{kN}$	568	552	547	532	519	505	473	461	196	187
墩底弯矩峰值 $J_2/(\text{kN}\cdot\text{m})$	5 029	4 943	4 911	4 853	4 676	4 517	4 221	4 125	1 765	1 673
中跨梁体位移峰值 $J_3/\text{cm}$	6.02	5.79	5.98	5.71	5.93	5.67	5.86	5.73	3.77	3.64
中跨梁体加速度峰值 $J_4/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	5.21	5.12	4.62	4.55	4.37	4.31	2.11	2.06	2.05	1.98
墩顶位移峰值 $J_5/\text{cm}$	1.93	1.84	1.91	1.82	1.89	1.79	1.87	1.75	0.73	0.65
墩底剪力均方差 $J_6/\text{kN}$	335	321	308	296	282	273	232	218	93	86
墩底弯矩均方差 $J_7/(\text{kN}\cdot\text{m})$	2 956	2 847	2 717	2 604	2 489	2 395	2 087	1 991	841	774
中跨梁体位移均方差 $J_8/\text{cm}$	3.47	3.32	3.25	3.13	3.08	2.97	2.74	2.65	1.73	1.65
中跨梁体加速度均方差 $J_9/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	3.34	3.16	2.76	2.63	2.28	2.16	1.13	1.05	0.97	0.88
墩顶位移均方差 $J_{10}/\text{cm}$	1.25	1.19	1.13	1.08	1.02	0.97	0.93	0.89	0.45	0.37
桥台处支座位移均方差 $J_{11}/\text{cm}$	3.45	3.36	3.11	3.03	2.94	2.87	2.72	2.61	1.71	1.62
桥墩处支座位移均方差 $J_{12}/\text{cm}$	3.42	3.23	3.09	3.02	2.91	2.84	2.69	2.58	1.67	1.58
结构耗能量 $J_{13}/\text{kJ}$	381	372	336	327	315	308	151	144	72	69
塑性铰数目 $J_{14}$	26	24	22	20	22	20	10	8	0	0
MRD 的实际最大出力 $J_{15}/\text{kN}$	—	—	326	317	351	343	907	897	995	986
MRD 的实际最大冲程 $J_{16}/\text{cm}$	—	—	18.3	17.9	19.6	19.2	40.1	39.3	49.6	49.2
所需的外部能量 $J_{17}/\text{kJ}$	—	—	0	—	9.823	9.714	5.265	5.137	3.385	3.246
所需的 MRD 数目 $J_{18}$	—	—	16	—	16	—	16	—	16	—
所需的传感器数目 $J_{19}$	—	—	—	—	—	—	28	—	20	—
所需的计算模态数目 $J_{20}$	—	—	—	—	—	—	28	—	0	—

MRD 的名义最大出力和冲程分别为 1000 kN 和 50 cm. 地震波选用 Loma Prieta (L), El Centro (E), Ninghe - Tianjin (N) 和 Kobe (K) 等 4 条强震记录, 并将它们的地震动峰值加速度 PGA 均调至  $0.25\text{ g}^{[10]}$ . 梁体及支座位移限值均为 6.00 cm, 梁墩的相对位移限值为 4.00 cm. 表 2 中的评价指标平均值 (Avg) 和最大值 (Max) 分别定义为

$$J_{\text{Avg}} = \operatorname{Ave}_{L,E,N,K} \{J_1 \sim J_{20}\},$$
$$J_{\text{Max}} = \operatorname{Max}_{L,E,N,K} \{J_1 \sim J_{20}\}. \quad (16)$$

由表 2 可知, FF 策略对  $J_1, J_2, J_3, J_4$  和  $J_5$  等响应峰值的控制效果比 Passive - off, Passive - on 和 CO 的都要好. 无控制桥梁的  $J_3$  最大值超出了梁体位移限值. 无控制, Passive - off 和 Passive - on 的梁墩相对位移 ( $J_3 \sim J_5$ ) 最大值均已超出限

表 1 逆模型的参数取值

Table 1 Parameters of the inverse model

参数	取值	参数	取值
$\mu_{x,a}/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	326.51	$\mu_{w,a}/\text{N}$	-137 290
$\mu_{x,b}/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	36.27	$\mu_{w,b}/\text{N}$	61 680
$\alpha_a/\text{mm}^{-1}$	12.18	$\mu_{w,c}/\text{N}$	550
$\alpha_b/\text{mm}^{-1}$	-3.62	$\alpha_c/\text{mm}^{-1}$	0.96
$d$	1.65	$\beta$	1.83

值;CO 对  $J_1, J_2, J_3$  和  $J_5$  的控制效果较差,其控制下的  $J_3 \sim J_5$  最大值逼近限值;FF 的  $J_1 \sim J_5$  比 CO 的要小得多. FF 的  $J_3 \sim J_5$  最大值已远离限值;FF 对  $J_6, J_7, J_8, J_9, J_{10}, J_{11}$  和  $J_{12}$  等响应均方差的控制效果比 Passive - off, Passive - on 和 CO 的都要好;FF 的  $J_{13}$  比 Passive - off, Passive - on 和 CO 的都要少. FF 的  $J_{14}$  为零,而后三种策略均出现了不同数目的塑性铰;FF 的  $J_{15}$  和  $J_{16}$  比 Passive - off, Passive - on 和 CO 的都要大得多. 可见 FF 比后三者更利于 MRD 性能的发挥;FF 的  $J_{17}$  比 Passive - on 和 CO 的都要少;FF 的  $J_{18}$  与 Passive - off, Passive - on 和 CO 的相同,FF 的  $J_{19}$  比 CO 的要多. FF 的  $J_{20}$  为零,而 CO 的  $J_{20}$  却较大.

由图 1 可以看出,在 N 波激励的整个时程内,FF 的梁体位移及墩底剪力比 CO 和无控制的都要小得多;图 2 为不同工况(地震波(L,E,N 和 K) + 控制策略(无控制, Passive - off, Passive - on, CO 和 FF))下的桥墩处支座位移峰值. 可以看出,FF 能将桥墩处的支座位移降至理想值,而 CO 的该位移值仍接近限值;由图 3 可知,在 E 波激励下,FF 的半主动控制力曲线光滑且无抖振出现.

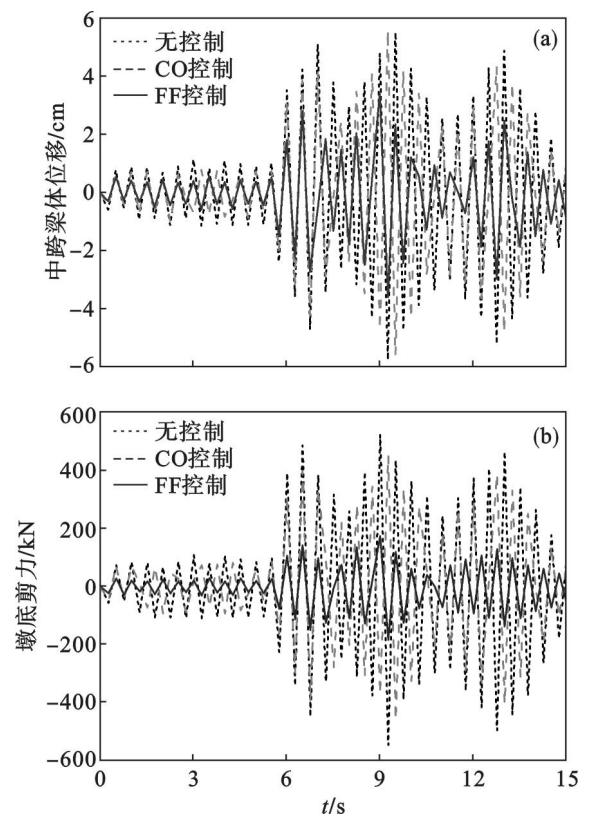


图 1 无控制与半主动控制桥梁的地震响应对比  
Fig. 1 Seismic response comparison between non-control bridges and semi-active control bridges  
(a) — 中跨梁体位移; (b) — 墩底剪力.

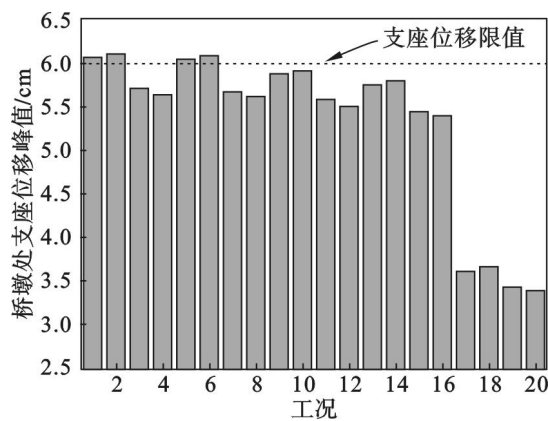


图 2 各种工况下的支座位移峰值  
Fig. 2 Peak bearing displacements of various cases

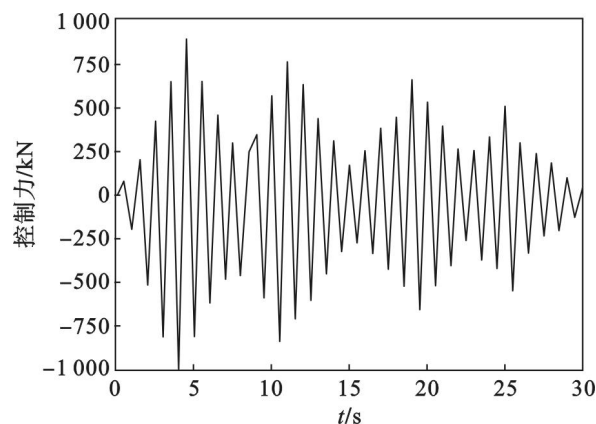


图 3 FF 策略的控制力时程  
Fig. 3 Time history of control force generated by FF strategy

表 3 ±30% 桥梁刚度扰动下的部分评价指标  
Table 3 Partial evaluation criteria due to ±30% bridge stiffness perturbed

评价指标	+ 30%		- 30%	
	CO	FF	CO	FF
$J_1/\text{kN}$	467	189	471	191
$J_3/\text{cm}$	5.78	3.67	5.83	3.70
$J_5/\text{cm}$	1.81	0.68	1.85	0.71
$J_7/(\text{kN}\cdot\text{m})$	2 027	785	2 084	787
$J_{11}/\text{cm}$	2.65	1.65	2.69	1.67
$J_{13}/\text{kJ}$	149	71	154	73
$J_{15}/\text{kN}$	892	984	898	986
$J_{17}/\text{kJ}$	5.447	3.328	5.492	3.356
$J_{20}$	28	0	28	0

由表 3 可知,FF 的评价指标值都明显小于 CO 的相应指标值. 可见在面对桥梁刚度发生 ±30% 扰动时,FF 策略的性能要明显优于 CO 策略,故 FF 控制器的鲁棒性要明显优于 CO 控制器.



## 4 结 论

本文提出的 FF 半主动控制策略能显著降低隔震桥梁的梁体及支座位移、梁体加速度、墩顶位移及墩底内力等响应峰值及均方差;FF 策略比 Passive-off, Passive-on 和 CO 策略更有利于 MRD 性能的发挥. FF 策略所需的传感器比后三种策略要少,且 FF 策略无需任何计算资源;FF 策略产生的控制力曲线很光滑且无抖振出现;FF 控制器的鲁棒性明显优于 CO 控制器.

### 参考文献:

- [1] Agrawal A, Tan P, Nagarajaiah S, et al. Benchmark structural control problem for a seismically excited highway bridge—part I: phase I problem definition[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2009, 16(5): 509–529.
- [2] Ali S, Ramaswamy A. Optimal dynamic inversion-based semi-active control of benchmark bridge using MR dampers[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2009, 16(5): 564–585.
- [3] Tan P, Agrawal A. Benchmark structural control problem for a seismically excited highway bridge—part II: phase I sample control designs[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2009, 16(5): 530–548.
- [4] Ning X L, Tan P, Huang D Y, et al. Application of adaptive fuzzy sliding mode control to a seismically excited highway

bridge[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2009, 16(6): 639–656.

- [5] Nagarajaiah S, Narasimhan S, Agrawal A, et al. Benchmark structural control problem for a seismically excited highway bridge—part III: phase II sample controller for the fully base-isolated case[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2009, 16(5): 549–563.
- [6] Maddaloni G, Caterino N, Occhiuzzi A. Semi-active control of the benchmark highway bridge based on seismic early warning systems[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2011, 9(5): 1703–1715.
- [7] Nakhmani A, Lichtsinder M, Zeheb E. Generalized bode envelopes and generalized Nyquist theorem for analysis of uncertain systems[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2011, 21(7): 752–767.
- [8] Yuan Y F, Wang Y N, Sun W, et al. RBF networks-based adaptive inverse model control system for electronic throttle[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2010, 18(3): 750–756.
- [9] 马涌泉, 陈水生. 基于屈服强度与支座分布影响的 LRB 隔震效果研究[J]. *西安理工大学学报*, 2011, 27(3): 373–378.  
(Ma Yong-quan, Chen Shui-sheng. Research on the influence of yield strength and bearings distribution on isolated effectiveness of LRB[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2011, 27(3): 373–378.)
- [10] JTG/TB02-01-2008. 公路桥梁抗震设计细则[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.  
(JTG/TB02-01-2008. Guidelines for seismic design of highway bridge[S]. Beijing: China Communications Press, 2008.)

(上接第 871 页)

### 参考文献:

- [1] 由美雁, 李现瑾, 王利伟, 等. 超声破解剩余污泥的研究[J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2014, 35(3): 447–451.  
(You Mei-yan, Li Xian-jin, Wang Li-wei, et al. Study on excess sludge disintegration by ultrasonic treatment[J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2014, 35(3): 447–451.)
- [2] Wang R K, Liu J Z, Hu Y X, et al. Ultrasonic sludge disintegration for improving the co-slurrying properties of municipal waste sludge and coal[J]. *Fuel Processing Technology*, 2014, 125: 94–105.
- [3] Wu C, Zhang G M, Zhang P Y, et al. Disintegration of excess activated sludge with potassium permanganate: feasibility, mechanisms and parameter optimization[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 240: 420–425.
- [4] Li H, Jin Y Y, Rasool B M, et al. Effects of ultrasonic disintegration on sludge microbial activity and dewaterability[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 161(2/3): 1421–1426.
- [5] Pilli S, Bhunia P, Yan S, et al. Ultrasonic pretreatment of sludge: a review[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2011, 18(1): 1–18.
- [6] Zheng L, Sun S Y, Xu Y B, et al. Effect of low power

ultrasound on aerobic/anoxic digestion of activated sludge[J]. *Water Science and Technology*, 2012, 65(5): 970–975.

- [7] He J G, Wan T, Zhang G G, et al. Ultrasonic reduction of excess sludge from activated sludge system: energy efficiency improvement via operation optimization[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2011, 18(1): 99–103.
- [8] 严希康, 俞俊棠. 生化分离工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001: 34–50.  
(Yan Xi-kang, Yu Jun-tang. Biochemical separation engineering[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2001: 34–50.)
- [9] Sekine K, Tolda T, Saito M, et al. A new morphologically characterized cell wall preparation (whole peptidoglycan) from *Bifidobacterium infantis* with a higher efficacy on the regression of an established tumor in mice[J]. *Cancer Research*, 1985, 45(3): 1300–1307.
- [10] 郑蕾, 田禹, 孙德智. pH 值对活性污泥胞外聚合物分子结构和表面特征影响研究[J]. *环境科学*, 2007, 28(7): 1507–1511.  
(Zheng Lei, Tian Yu, Sun De-zhi. Effects of pH on the surface characteristics and molecular structure of extracellular polymeric substances from activated sludge[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(7): 1507–1511.)